

Ухтинский государственный технический университет

На правах рукописи



МИХАЛЕВ АНДРЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ
НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ С МАЛОЙ НАГРУЗКОЙ**

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2012

Диссертация выполнена в ФБГОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук
Руслан Викторович Агинец

Официальные оппоненты: Василий Иванович Кучерявый,
доктор технических наук, профессор,
Ухтинский государственный технический университет, профессор кафедры «Сопротивления материалов и деталей машин»

Александр Сергеевич Кузьбожев,
доктор технических наук,
филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта,
заведующий лабораторией «Натурных исследований объектов газотранспортной системы»

Ведущая организация: ООО «Газпром трансгаз Ухта»

Защита состоится 24 мая 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат разослан 20 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор



Н. М. Уляшева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Системы магистрального трубопроводного транспорта газа и нефти эксплуатируются в течение длительного времени. Основная часть нефтегазопроводов выработала более 50% назначенного ресурса, а часть из них работают с выработкой более чем 100% назначенного ресурса.

В результате действия на трубопроводы различных факторов (постоянные статические нагрузки, переменные нагрузки, пульсации среды в системе, изменение температуры окружающего грунта и транспортируемой среды) со временем происходят преобразования в структуре металла труб, снижающие остаточный ресурс металла, что подтверждают исследования механических свойств металла длительно эксплуатируемых трубопроводов, результаты электронной микроскопии. В частности, профессором И.Н. Андроновым предложен метод оценки ресурса металла труб по произведению значений временного сопротивления разрыву и относительного удлинения образцов при статическом растяжении.

Однако подобные изменения в металле не всегда могут быть зафиксированы с помощью стандартных методов испытания материалов, что не позволяет корректно оценить остаточный ресурс основного металла труб, кроме того все существующие методы оценки ресурса металла имеют разрушающий характер и неприменимы к действующим объектам.

Оценка остаточного ресурса металла труб нефтегазопроводов является актуальной задачей и для повторного использования бывших в эксплуатации труб как в составе объектов транспорта нефти и газа, так и для изготовления из них ремонтных конструкций, в частности трубных катушек и обечаек ремонтных муфт. Действующие отраслевые нормативные документы предлагают оценивать состояние металла путем определения его механических характеристик. Методов, позволяющих оценить остаточный ресурс металла труб без его разрушения в настоящий момент не разработано.

Цель работы. Разработка неразрушающего метода оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов по значениям параметров распределения твердости с малой нагрузкой.

Задачи исследования:

- установление степени однородности изменения распределения ТМН испытуемого объекта под действием различных факторов (напряжений в металле, температуры измерения, времени);
- исследование изменения распределения ТМН трубной стали под действием нагрузки в области упругой деформации;
- проведение ресурсных испытаний с целью исследования возможности оценки остаточного ресурса нефтегазопроводов по результатам многократного измерения ТМН;
- разработка методики реализации предлагаемого метода на нефтегазопроводах.

Научная новизна:

1. Установлено, что микропластические изменения в сталях трубопроводов, определяемые по значению дисперсии ТМН, отмечаются при статическом наружении $0,7\sigma_{0,2}$ через время 30 мин.
2. Установлено, что приращение дисперсии ТМН при стендовых циклических испытаниях пропорционально числу отнулевых циклов и определяется формулой $S^2 - S_m^2 = 0,1N$.
3. Изменение дисперсии ТМН S^2 является необратимым и изменяется при релаксации металла за 12 месяцев на величину, не превышающую погрешности измерения прибора.
4. По результатам ресурсных испытаний на усталостную прочность трубной стали установлена эмпирическая формула для определения максимального числа циклов до разрушения $N_{max} = N + 6,0S^2$, где N - текущее число циклов.
5. Установлен феномен различного влияния напряжений в металле на значения дисперсии ТМН: увеличение дисперсии для металла, обладающего большим остаточным ресурсом ($S^2 < 800$) и ее уменьшение для поврежденного материала ($S^2 > 800$).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием для исследования образцов из фрагментов металла труб, бывших в эксплуатации в составе магистрального газопровода, значительным количеством измерений, выраженным большими объемами выборок значений ТМН (не менее 100), использованием

поверенного оборудования и приборов.

Основные защищаемые положения:

1. Значение дисперсии ТМН S^2 зависит от неоднородности структуры металла, обусловленной его поврежденностью, механических напряжений в металле объекта и от его температуры.

2. Дисперсия ТМН S^2 является параметром, характеризующим поврежденность и остаточный ресурс конструкционных низколегированных сталей перлитно-ферритного класса. В процессе эксплуатации основного металла нефтегазопроводов значения дисперсии ТМН линейно увеличиваются от начального значения 200-300 $НВ^2$ до конечных, определяемых на разрушенных образцах 2000-2500 $НВ^2$.

3. Разработанная методика позволяет оценить ресурс основного металла трубопроводов без его разрушения.

Практическая ценность заключается в разработке метода оценки остаточного ресурса основного металла нефтегазопроводов, базирующегося на многократном измерении твердости с малой нагрузкой. Также на основе метода разработана методика оценки остаточного ресурса основного металла действующих нефтегазопроводов.

Результаты работы использовались:

- при выполнении работ темы «Разработка неразрушающего метода оценки функционального состояния металла трубопроводов на основе тестирования твердости с малой нагрузкой» в рамках проведения Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы;

- при формировании учебных материалов для организации учебного процесса подготовки магистров по программе 131006 – Надежность газонефтепроводов и хранилищ на кафедре «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов» Ухтинского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлялись, докладывались и обсуждались на межрегиональных семинарах «Рассохинские чтения» (УГТУ, г. Ухта, 2010, 2011, 2012 г.), IV научно-практической конференции молодых специалистов ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 2009 г.), VII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ООО «Газ-

пром ВНИИГАЗ» «Инновации в нефтегазовой отрасли» (г. Ухта, 2009 г.), X – XIII международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех» (УГТУ, г. Ухта, 2009, 2010, 2011, 2012 г.), VI и VII международных учебно-научно-практических конференциях «Трубопроводный транспорт» (УГНТУ, г. Уфа, 2009, 2011 г.), IV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы трубопроводного транспорта Западной Сибири» (ТГНГУ, г. Тюмень, 2010 г.), X - XII научно-технических конференциях молодежи ОАО «Северные МН» (ОАО «Северные МН, г. Ухта, 2009, 2010, 2011 г.), научно-технических конференциях УГТУ (г. Ухта, 2009, 2010, 2011 г.), открытом научно-техническом семинаре работников ИТЦ ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 2011 г.), конференции 8-го Международного молодежного нефтегазового форума (КазНТУ, г. Алматы, 2011 г.), VII международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта» (ПГУ, г. Новополоцк, 2011 г.), VI научно-практическая конференция молодых работников ООО «Газпром трансгаз Ухта» (г. Ухта, 2011 г.), научно-технических семинарах кафедры ПЭМГ УГТУ (Ухта, 2009-2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 2 в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК России.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Содержит 128 страниц текста, включая 41 рисунок и список литературы из 112 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и значимость выбранной темы, степень ее разработанности, охарактеризованы научно-методические пути ее решения.

В первой главе «Анализ средств и методов оценки ресурса основного металла трубопроводов» проанализированы существующие подходы к вопросам снижения ресурса металла нефтегазопроводов и методы его оценки.

В ходе анализа использовались как источники труды специалистов в области оценки работоспособности и ресурса нефтегазопроводов и оценки свойств конструкционных материалов: Андропова И. Н., Бабич В.К., Болотова В. В., Бородавкина П. П., Ивановой В. С., Иванцова О. М., Коттрелла А. Х., Кучерявого В. И., Мил-

лера К. Ж., Кузьбожева А. С., Марковца М. П., Харионовского В. В., Черняева В. Д., Чувильдеева В. Н. и др.

Одной из основных причин снижения ресурса нефтегазопроводов современные исследователи называют деградацию металла труб. Выделяются два механизма деградации металла: старение и усталостное накопление поврежденности.

Известным фактом является изменение механических свойств металла нефтегазопроводов с возрастанием длительности их эксплуатации (пределы текучести $\sigma_{0,2}$ и прочности σ_b увеличиваются на 5-15%; ударная вязкость уменьшается на 20-50%; температура хрупко-вязкого перехода смещается в область повышенных температур). Однако установить тенденцию к ухудшению свойств испытуемого металла можно лишь при больших количествах испытаний с последующей статистической обработкой результатов. Важно отметить, что методы определения механических свойств металла имеют разрушающий характер и неприменимы для оценки состояния металла действующих объектов.

Профессором В.Н. Чувилеевым предложен метод оценки состояния металла нефтегазопроводов, позволяющий регистрировать деградационные процессы и базирующийся на определении предела макроупругости σ_0 , определяемом при испытании на релаксацию дисковых образцов. Протекание процессов старения в металле труб нефтегазопроводов неизбежно приводит к снижению значений σ_0 . В процессе старения величина стандартных механических характеристик остается практически неизменной, при этом уровень допустимых рабочих напряжений $\sigma_{\text{раб}}$, рассчитываемый из предела текучести σ_T в состаренной стали выбирается таким же, как и для не-состаренной стали. Однако по причине снижения σ_0 величина $\sigma_{\text{раб}}$ оказывается выше предела макроупругости, в результате состаренный металл при рабочих нагрузках работает не в области упругости, а в области микропластических деформаций, т. е. условие длительной прочности для состаренного металла не выполняется. Данный метод является разрушающим, реализуется с помощью испытаний на релаксацию на цилиндрических образцах металла.

К неразрушающим методам оценки работоспособности металла действующих нефтегазопроводов относится метод, реализуемый путем многократного измерения твердости с малой нагрузкой (ТМН) и последующей статистической обработкой ре-

зультатов, предложенный А.С. Кузьбожевым. Автором доказано, что метод чувствителен к напряженному состоянию трубопроводов и позволяет оценить динамику изменения свойств металла во время эксплуатации объекта, что позволяет прогнозировать его работоспособность.

Однако, несмотря на значительную проработку метода, остаются неосвещенным ряд вопросов, связанный с его практической реализацией. В частности не установлена связь между параметрами распределения ТМН металла испытываемого объекта с его ресурсом.

В общем случае значения дисперсии ТМН зависит от множества факторов и в определяется как

$$S^2 = S_m^2 + S_d^2 + S_n^2 + S_t^2 + S_b^2, \quad (1)$$

где S_m^2 – изначальная неоднородность структуры испытываемого металла, $HВ^2$;

S_d^2 – неоднородность структуры металла, образовавшаяся в результате процессов деградации металла (старения и усталости), $HВ^2$;

S_n^2 – влияние механических напряжений в испытываемом металле, $HВ^2$;

S_t^2 – влияние температуры испытываемого объекта, $HВ^2$;

S_b^2 – влияние изменения дисперсии ТМН во времени, $HВ^2$.

Во второй главе *«Исследование изменения распределения значений твердости с малой нагрузкой под действием статических нагрузок»* был проведен ряд лабораторных исследований с применением образцов с размерами 4 x 4 x 210 мм, изготовленных из фрагментов бывших в эксплуатации труб магистральных газопроводов. Марка стали - 17Г1С. Образцы нагружались с помощью машины, позволяющей создавать в образцах статическое напряжение.

Целью первого этапа исследований было установление однородности изменения распределения ТМН испытываемого объекта. На 5 образцах отмечали по 4 зоны контроля, по которым производили многократное (не менее 100 раз) измерение твердости с малой нагрузкой (ТМН) равномерно по всей поверхности, затем к образцам прилагалась нагрузка, создающая в металле статическое одноосное напряжение $\sigma = 250$ МПа. После снятия нагрузки повторно проводили многократное измерение ТМН по всем зонам контроля. Результаты испытаний представлены на рис. 1.

Установлено, что при нагружении до $0,7\sigma_{0,2}$ в испытуемом металле происходит изменение значений параметров распределения ТМН, характер изменений однородный для среднего значения твердости, значений медианы, моды и дисперсии ТМН. Для асимметрии и эксцесса однородность изменения не установлена.

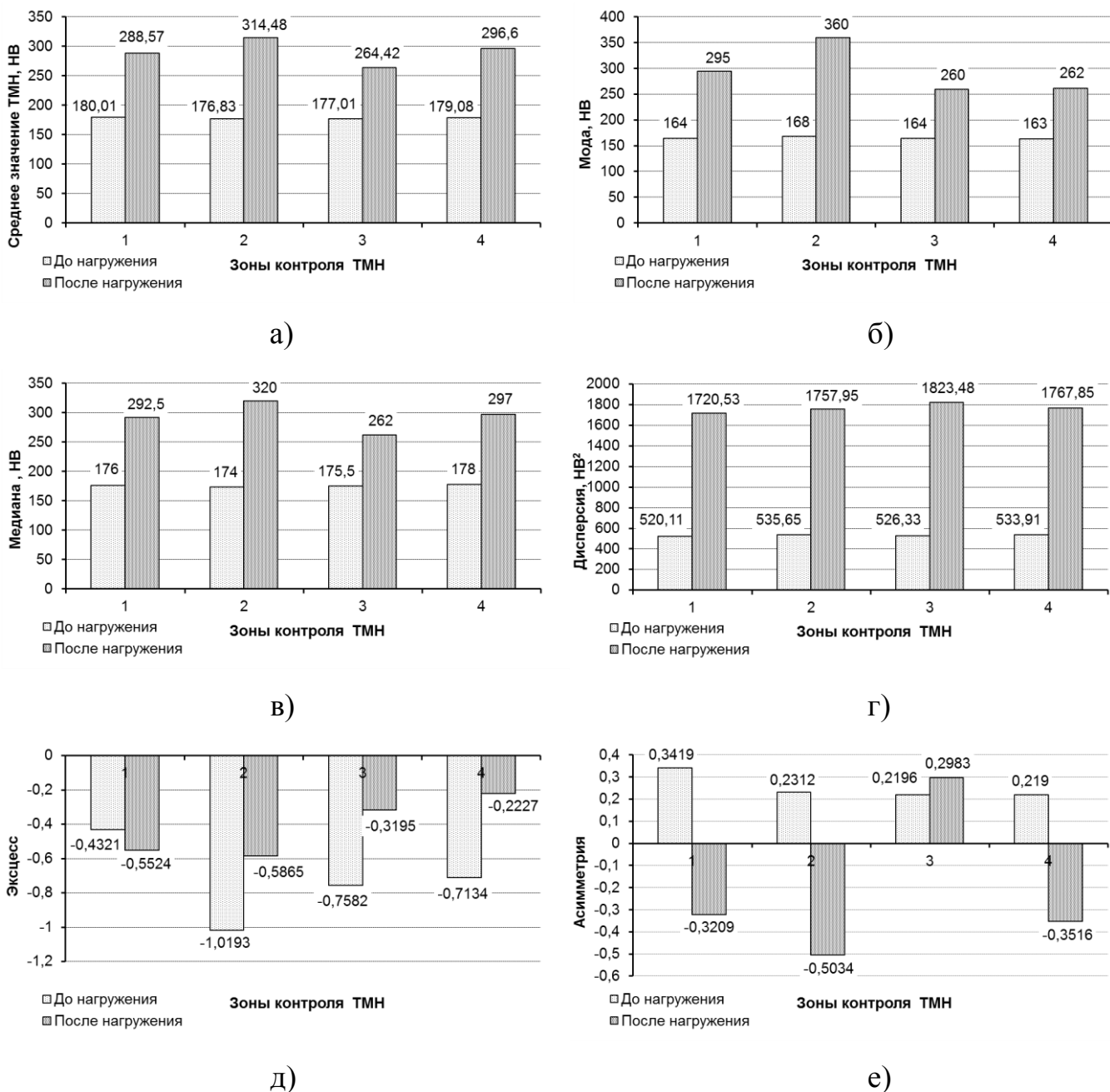


Рис. 1. Изменение значений статистических параметров распределения ТМН под действием статической нагрузки: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии; д – эксцесса; е – асимметрии

Второй этап исследований проводился для определения характера изменения значений параметров распределения ТМН нагруженном образце во времени. Перед началом испытания многократно (не менее 100 раз) измеряли ТМН по всей поверхности образцов. Далее к образцам прикладывалась нагрузка, создающая в металле статическое одноосное напряжение $\sigma = 250$ МПа. Сразу после приложения нагрузки

и далее с шагом в 10 минут и проводились повторные измерения ТМН по поверхности. Обобщенные результаты испытаний по 5 образцам на рис. 2.

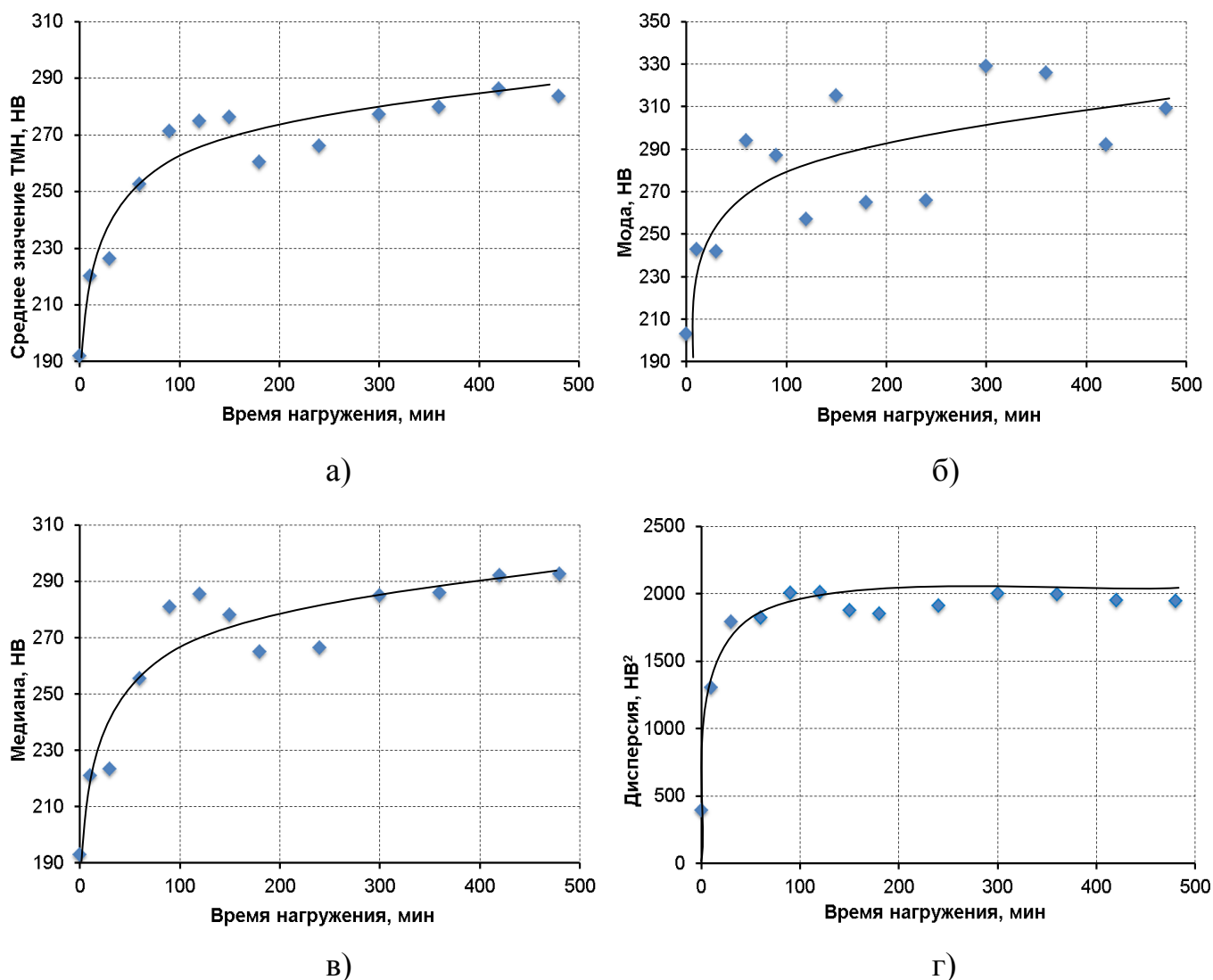


Рис. 2. Изменение значений параметров распределения ТМН в присутствии механических напряжений в испытуемом металле во времени: а – среднего значения ТМН; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Установлено, что изменение значений параметров распределения ТМН происходит сразу после приложения нагрузки к образцу. Изменение среднего значения, моды и медианы постоянно до окончания испытания, рост значений дисперсии ТМН наблюдается полчаса, после чего стабилизируется.

В рамках третьего этапа оценивалась степень влияния напряжений в испытуемом металле на распределение ТМН в зоне упругих деформаций. После многократного измерения ТМН образцы нагружали поэтапно, напряжения в металле образцов увеличивались с шагом в 30 МПа. На каждом этапе нагружения образцов с получасовым интервалом многократно измеряли ТМН. Результаты испытаний с использованием 4 образцов представлены на рис. 3.

Обнаружена зависимость между величиной напряжений в металле образцов и средним значением, медианой, а также дисперсией ТМН.

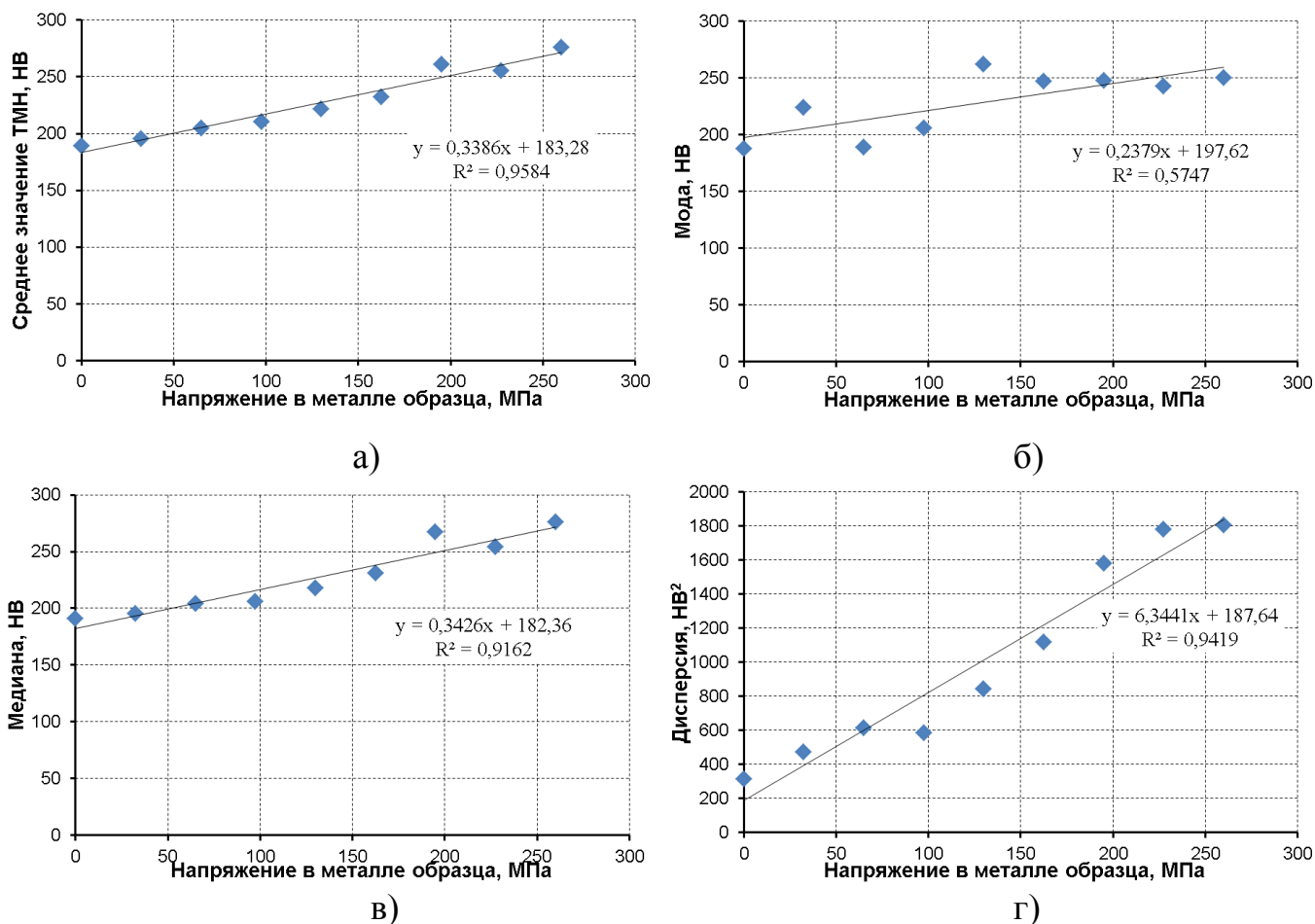


Рис. 3. Зависимость значений параметров распределения ТМН от напряжений в образце: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Четвертый этап исследований проводился с целью получения информации о также при снятии нагрузки. Испытания проводили в следующем порядке: многократно измеряли ТМН по всей поверхности образцов, поэтапно нагружали образец, а после заданного максимума начали пошаговое снятие нагрузки. Шаг нагружения (разгружения) – 30 МПа, интервал изменения нагрузки и измерения ТМН – 30 минут. Максимальная величина напряжений в металле образцов, созданных в ходе испытаний $\sigma = 250$ МПа. Обобщенные результаты испытаний по 7 образцам представлены на рис. 4.

Установлено, что изменение значений параметров распределения ТМН носит обратимый характер. Значения параметров, определяемых по результатам многократного измерения ТМН, увеличивались в ходе нагружения образцов, а по ходу поэтапного снижения нагрузки наблюдалось уменьшение их значений, среднее значе-

ние твердости и медиана после полного снятия нагрузки вернулись к значениям, соответствующим первоначальным.

Значения дисперсии ТМН после проведения испытаний не вернулись к первоначальным. Конечные значения дисперсии ТМН превышало начальные не менее чем на 25%.

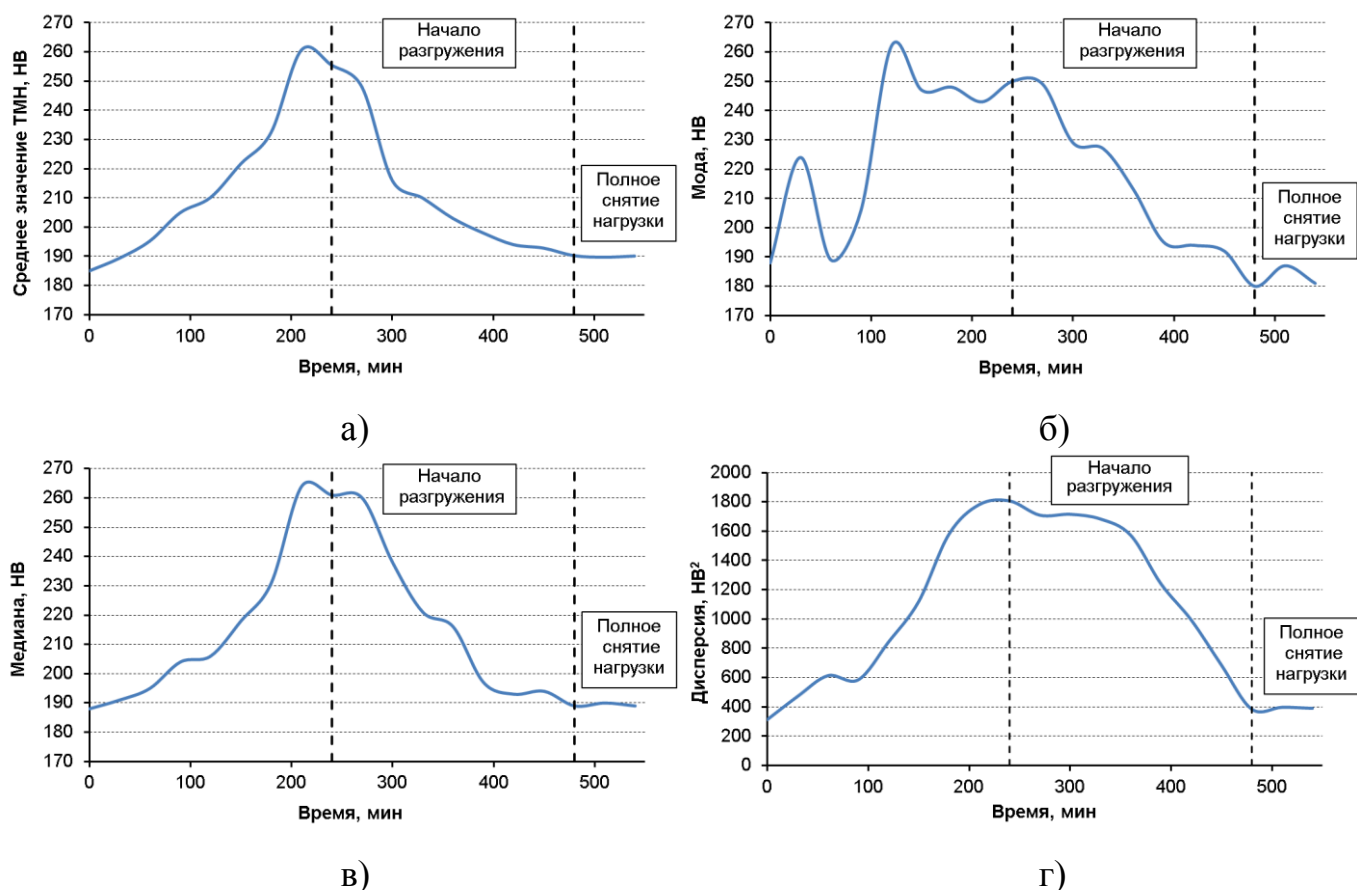
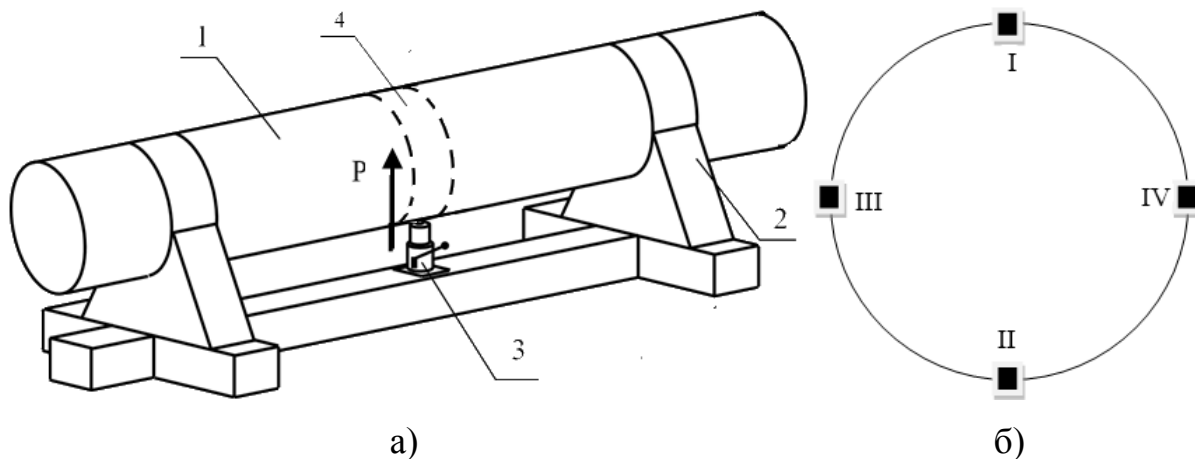


Рис. 4. Изменение значений параметров распределения ТМН при поэтапном нагружении образцов с последующим снятием нагрузки: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

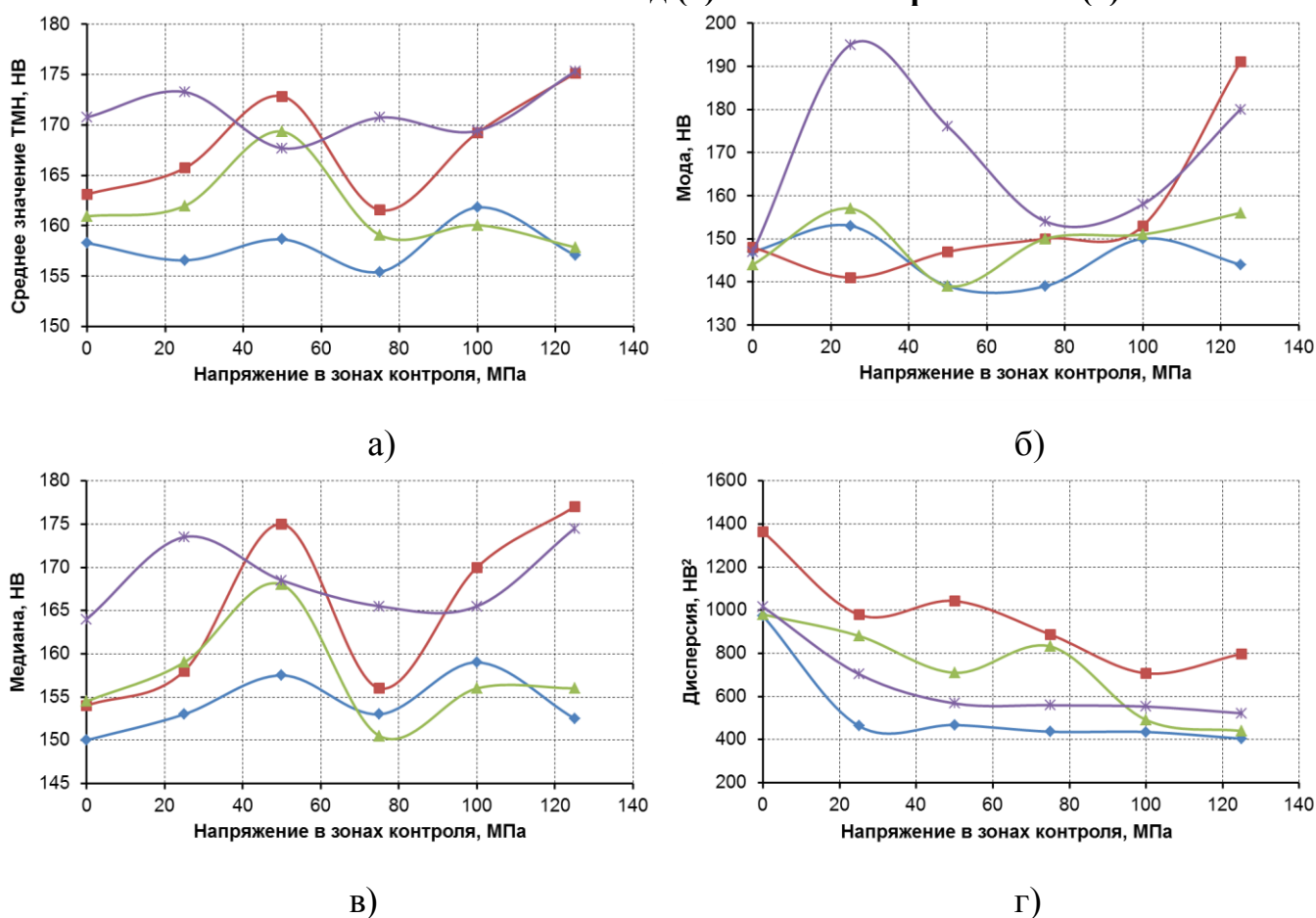
Далее исследовалось изменение значений параметров распределения ТМН при приложении нагрузки при измерениях на поврежденном металле, длительно находившемся в эксплуатации на стенде (рис. 5). Трубный элемент стенда имеет следующие параметры: срок эксплуатации в составе действующего объекта – 30 лет, наружный диаметр $D = 325$ мм, длина $L = 3$ м, толщина стенки $\delta = 8$ мм, материал – сталь марки 14ХГС.

Поэтапно увеличивали прилагаемое к трубному элементу стенда усилие, на каждом шаге нагружения напряжения в испытуемом металле увеличивались на 25 МПа до 125 МПа. Многократно измеряли ТМН до нагружения стенда и на каждом этапе нагружения по всем зонам контроля. Результаты испытаний представлены на рис. 6.



I, II, III, IV – обозначения зон контроля ТМН
 1 – трубный элемент, 2 – неподвижная опора, 3 – гидравлический домкрат;
 4 – место расположения зон контроля

Рис. 5. Испытательный стенд (а) и зоны контроля ТМН (б)



Зоны контроля: ◆ – I; ■ – II; ▲ – III; X – IV.

Рис. 6. Изменение значений параметров распределения ТМН при поэтапном нагружении к стенда: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Не установлено зависимости между изменением среднего значения, моды и медианы от напряжений в металле. Установлено, что значения дисперсии ТМН уменьшались во время приложения нагрузки к трубному элементу стенда.

В третьей главе «Исследование ТМН образцов испытанных на ударный изгиб» описаны исследования, основной целью которых было установление связи

между значениями параметров распределения ТМН и ударной вязкостью.

Для проведения испытаний из фрагментов основного металла магистральных трубопроводов бывших в эксплуатации разное время было изготовлено 18 образцов для испытаний на ударный изгиб. Марка стали – 17Г1С. На образцы наносился концентратор U-типа. Разделенные на 3 группы по температуре проведения испытаний (20 °С – группа 1, 0 °С – 2 группа и минус 40 °С – 3 группа) образцы были испытаны на ударный изгиб согласно ГОСТ 9454-78. Все образцы были разрушены, результаты испытаний представлены в табл. 1.

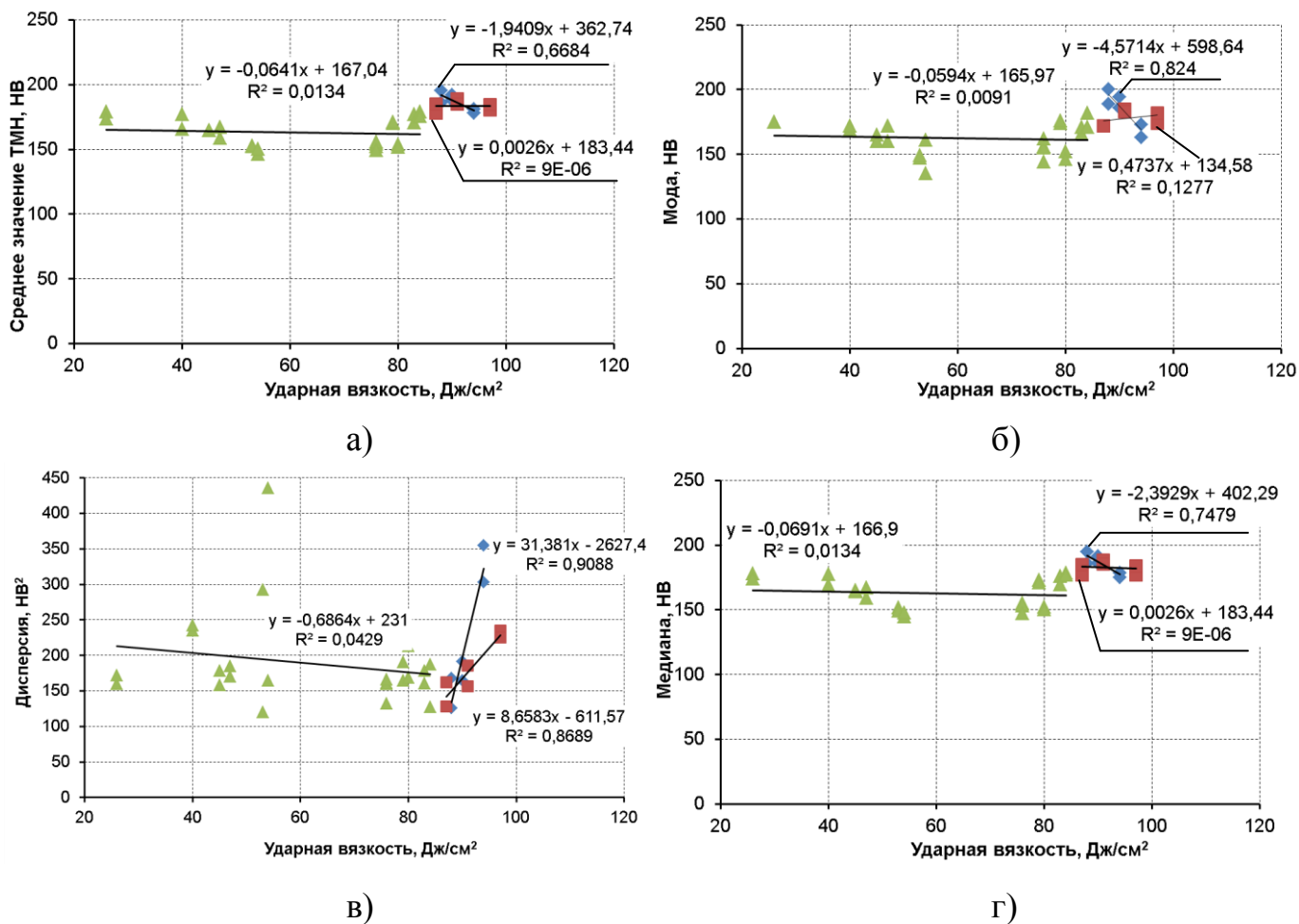
Табл. 1. Результаты испытаний на ударный изгиб

Номер группы	1 (20 °С)			2 (0 °С)			3 (минус 40 °С)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
КСУ, Дж/см ²	94	90	88	97	91	87	47	53	54	79	83	84	45	40	26	76	76	80

После испытаний на ударный изгиб по поверхности каждой части всех разрушенных образцов многократно измеряли ТМН. Результаты сопоставления значений параметров распределения ТМН на удалении от излома со значениями ударной вязкости образцов представлены на рис. 7.

На образцах, испытанных на ударный изгиб при положительных температурах (группы 1 и 2) среднее значение твердости для образцов варьируется в пределах погрешности твердомера, изменение расчетных статистических характеристик также незначительно. На образцах, испытанных на ударный изгиб при отрицательных температурах (группа 3) наблюдается значительный разброс по всем рассчитываемым параметрам распределения ТМН, значительно превышающий погрешность измерения. Для данной выборки образцов установлены линейные зависимости дисперсии от ударной вязкости, определенной при положительных температурах (группа 1 и 2), коэффициенты достоверности аппроксимации R^2 равны 0,9088 и 0,8689 соответственно.

Для подтверждения достоверности полученных результатов необходимо оценить однородность материала испытываемых образцов, для этого проверим принадлежность всех выборок значений твердости единой генеральной совокупности. Для этого воспользуемся непараметрическим критерием Краскера и Уоллиса.



◆ - группа 1; ■ – группа 2; ▲ – группа 3

Рис. 7. Зависимость значений параметров распределения ТМН от значений ударной вязкости: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Общее число результатов испытаний $n = \sum_{i=1}^m n_i$, принадлежащих m независи-

мым выборкам (1, 2, ..., i, ..., m), располагают в единый вариационный ряд и каждому значению члена ряда присваивают соответствующий ранг от 1 до n с отметкой номера выборки. Для равных значений членов вариационного ряда, принадлежащих разным выборкам, присваивают одинаковый (средний) ранг.

Статистикой критерия Краскела и Уоллиса служит величина

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \left(\sum_{i=1}^m \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(n+1), \quad (2)$$

где R_i - сумма рангов i -й выборки.

Правильность подсчета ранговых сумм R_i контролируют по формуле:

$$\sum_{i=1}^m R_i = \frac{1}{2} n(n+1). \quad (3)$$

Величина H при $n_i > 5$ и $m > 4$ распределена по закону χ^2 с $k=m-1$ степенями свободы.

В случае выполнения неравенства

$$H \leq \chi_{\alpha}^2, \quad (4)$$

нулевую гипотезу о тождественности генеральных распределений, из которых взяты выборки, не отвергают. В противном случае принимают альтернативную гипотезу о неоднородности совокупностей. В дальнейшем путем отбрасывания резко выделяющихся выборок, для которых ранговые суммы чрезмерно малы или велики, на основании условия (3) можно выделить однородную группу выборок.

При равных объемах отдельных выборок ($n_1 = n_2 = \dots = n_m = n/m$) статистику H допускается вычислять по формуле

$$H = \frac{12m}{n^2(n+1)} \left(\sum_{i=1}^m R_i^2 \right) - 3(n+1). \quad (5)$$

Задавшись уровнем значимости $\alpha = 0,05$ при общем числе в 1800 измерений твердости, соответствующих 18 образцам (выборкам) определили критическое значение $\chi_{0,05}^2 = 35,7$.

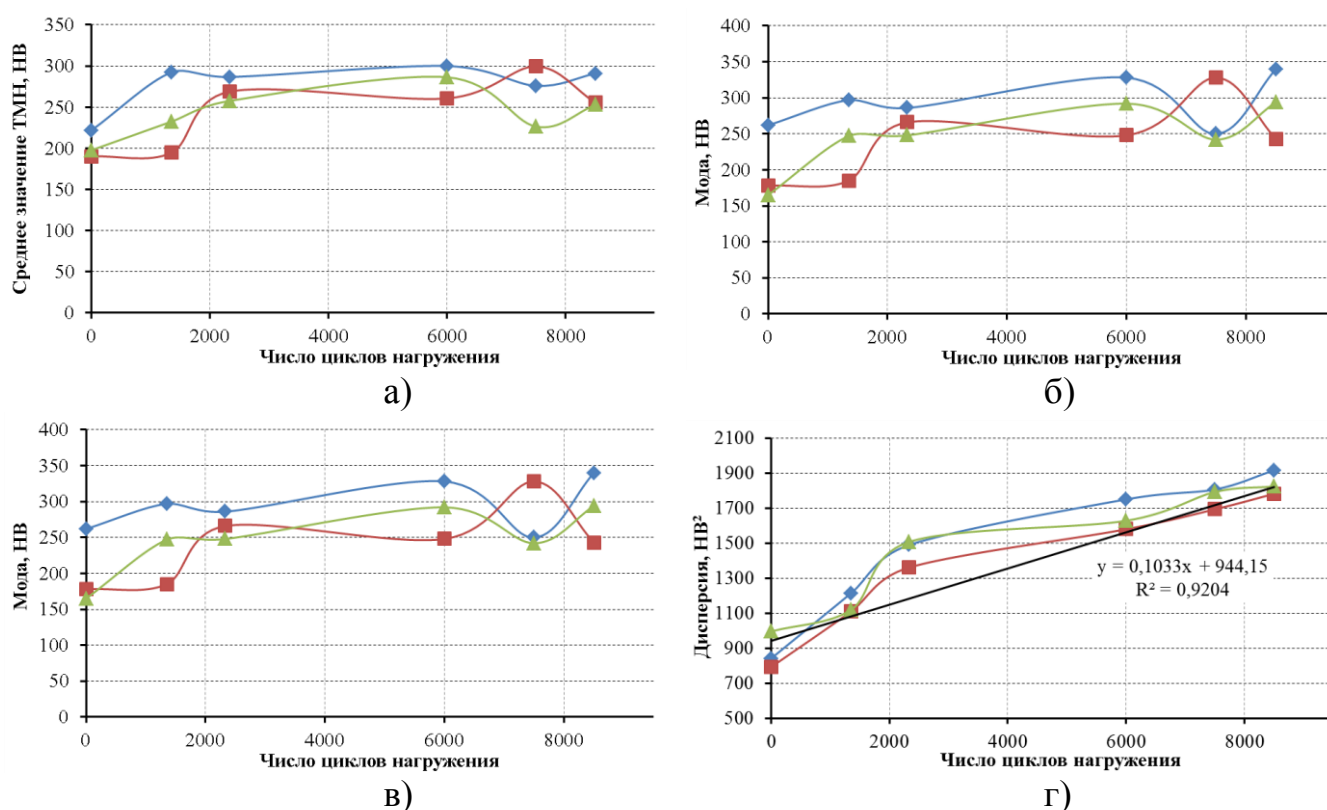
Установлено, что выборки значений твердости, соответствующие 1 и 2 группе образцов принадлежат единой генеральной совокупности, значения твердости по 3 группе образцов были исключены в ходе вычислений как несоответствующие.

В четвертой главе «Ресурсные стендовые и лабораторные испытания металла длительно эксплуатируемых газопроводов» приводится описание ресурсных испытаний металла, проводившихся в два этапа: на полноразмерном промышленном стенде и с использованием образцов.

В ходе первого этапа испытаний в качестве объекта испытания принималась труба, которая в течение 30 лет проработала в составе магистрального газопровода. Диаметр трубы – 1420 мм, толщина стенки - 16,7 мм, длина - 5 м. Марка стали - 09Г2ФБ. Для проведения измерений ТМН выделены три зоны: зона 1 расположена на удалении в 52 мм от продольного сварного шва, на удалении в 30 мм от зоны контроля присутствует сетка мелких трещин длиной 2-3 мм. Зона 2 и зона 3 расположены на бездефектных участках: зона 2 на расстоянии 373 мм от сварного шва, а зона 3 в непосредственной близости с продольным сварным швом, в области термического влияния. Стенд циклически нагружался 8500 раз в режиме $0 - P_{\text{раб}} - 0$, где $P_{\text{раб}} = 7,4$ МПа, что приводило к накоплению поврежденности металла, разрушения стенда не

произошло. Производили пересчет числа циклов в годы эксплуатации, симитированных в ходе испытаний согласно «Руководству по проведению ресурсных испытаний труб, отремонтированных с применением муфтовых и сварочных технологий» ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Определено, что 8500 циклов соответствует длительности эксплуатации в течение 15,32 лет, таким образом 1 году эксплуатации соответствует 554,8 цикла нагружения $0 - P_{\text{раб}} - 0$.

Измеряли ТМН до начала нагружения и после реализации разного количества циклов по всем зонам контроля (рис. 8).



◆ - 1 зона контроля; ■ – 2 зона контроля; ▲ – 3 зона контроля

Рис. 8. Зависимость значений параметров ТМН от накопления повреждаемости в металле под действием циклических нагрузок: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Установлено, что металл трубопровода имел изначально повышенный разброс значений твердости с дисперсией 800-1000 НВ², что свидетельствует о наличии начальной поврежденности металла в процессе эксплуатации в составе газопровода. Отмечена тенденция увеличения дисперсии показаний ТМН с ростом количества циклов испытания, т.е. времени эксплуатации трубопровода, что подтверждает возможность тестирования поврежденности металла трубопроводов методом ТМН.

Коэффициент корреляции между дисперсией показаний ТМН и количеством циклов по всем зонам контроля составляет 0,94-0,96. Значения дисперсии с ростом

накопления повреждаемости изменяются по закону

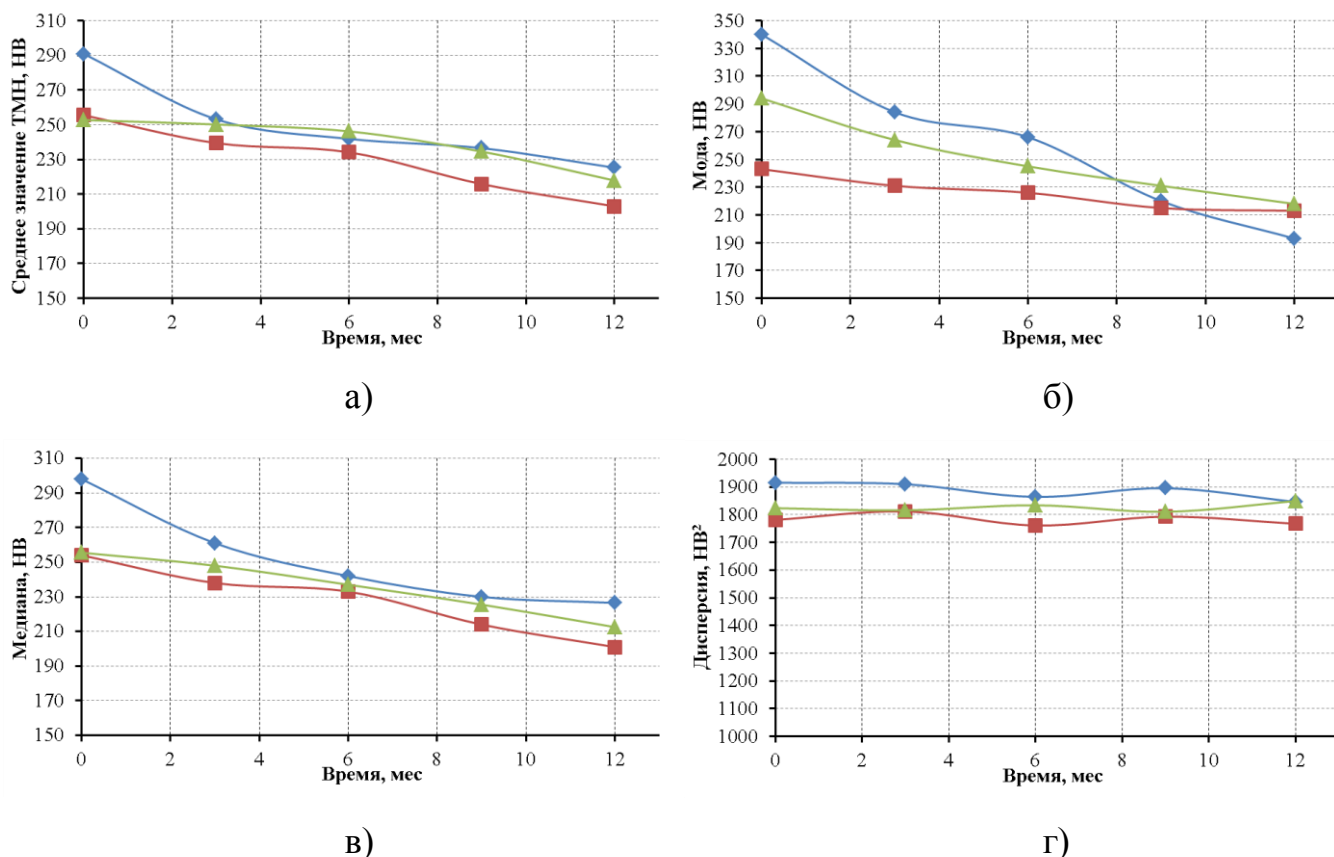
$$S^2 = 0,1N + S^2_{\text{м}}, \quad (6)$$

где N – число циклов перепада давления в трубопроводе за расчетный период;

$S^2_{\text{м}}$ – начальная неоднородность структуры испытуемого металла, HB^2 .

Среднее значение ТМН, мода и медиана после испытаний имели более высокие значения, увеличились в среднем на 25-30%. Зависимости между значениями эксцесса рассеяния и коэффициента асимметрии и количеством циклов не установлено. Существенного влияния дефектной области и продольных сварных швов на результаты измерения не обнаружено.

Для установления изменений значений параметров распределения ТМН во времени после испытаний из стенда были удалены фрагменты металла, содержащие зоны контроля. ТМН измеряли с интервалом в 3 месяца в течение года (рис. 9).



◆ - 1 зона контроля; ■ – 2 зона контроля; ▲ – 3 зона контроля

Рис. 9. Изменение значений параметров распределения ТМН во времени после испытаний: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Установлено, что происходит уменьшение среднего значения, моды и медианы ТМН при нахождении металла в ненагруженном состоянии в течение времени. После 12 месяцев в состоянии покоя эти значения снизились в среднем на 25-40% по всем зонам контроля. Значения дисперсии в течение времени изменялись незначительно и

отличались от определенных после испытаний не более чем на 5%.

Таким образом, с учетом постоянства дисперсии значений ТМН во времени, установлено, что для материала стенда при имитации 1 года эксплуатации объекта происходило увеличение дисперсии ТМН в среднем на $\Delta S^2 = 60 \div 80 \text{ НВ}^2$. Важно отметить, что работа газопровода имитировалась с известным числом циклов перепада давления в трубопроводе и без присутствия коррозионно-активных факторов.

Ресурсные испытания проводили на 15 плоских стальных образцах с размерами 4 x 4 x 50 мм. Вырезка образцов осуществлялась из фрагментов металла магистральных газопроводов с разным сроком эксплуатации (от 10 до 30 лет). Марка стали 17Г1С. Образцы подвергались циклическому изгибающему нагружению с постоянной амплитудой. Все образцы были разрушены. Ресурс металла образцов определяется числом циклов нагружения N , которое образцы выдерживали до разрушения. ТМН измерялась до начала испытаний, значения параметров распределения сопоставлялись с числом циклов нагружения образцов (рис. 10).

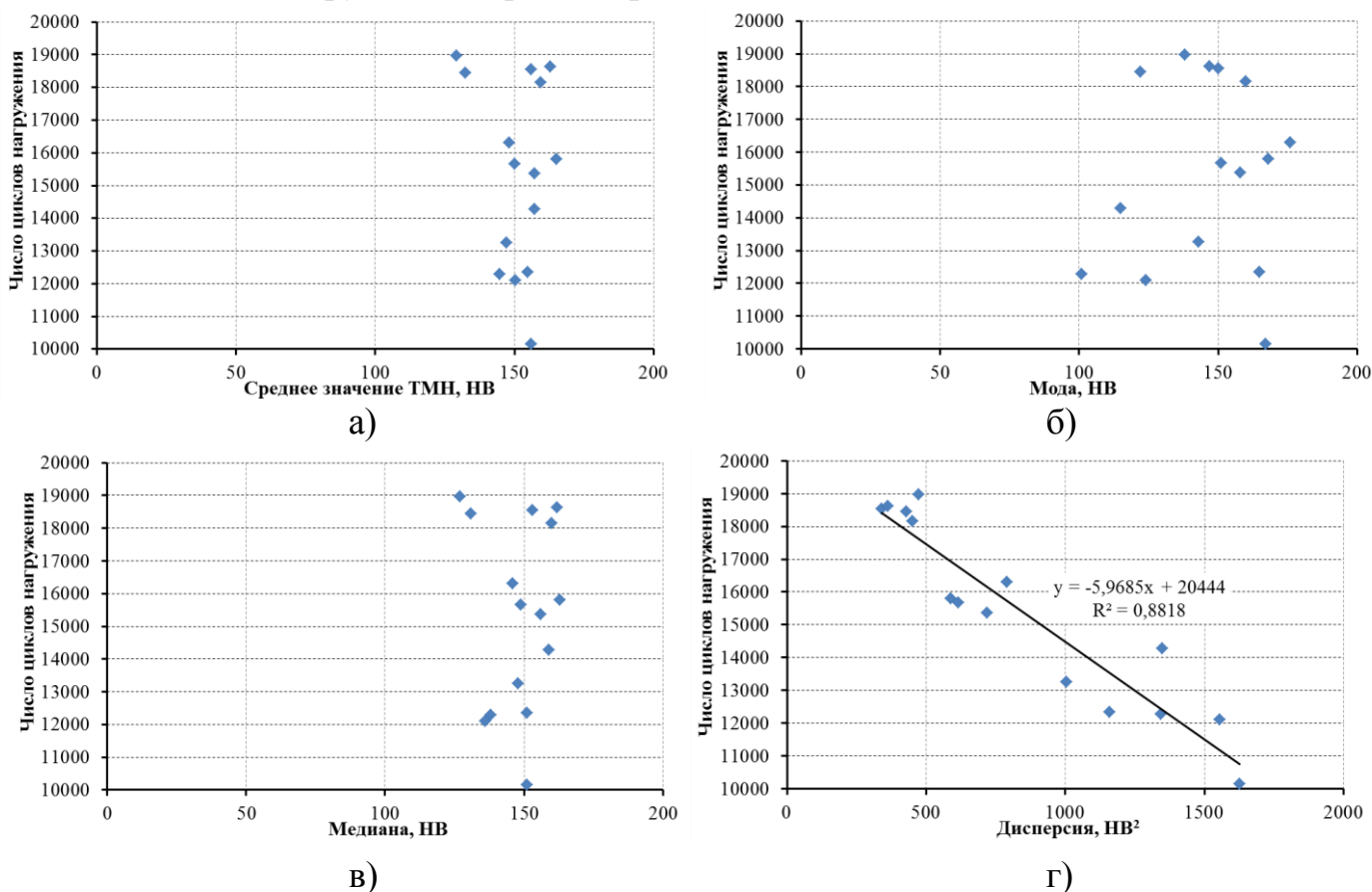


Рис. 10. Зависимость значений параметров распределения ТМН от числа циклов нагружения, выдерживаемого образцом до разрушения: а – среднего значения; б – моды; в – медианы; г – дисперсии

Установлена линейная зависимость между значениями дисперсии ТМН и числом циклов нагружения до разрушения, коэффициент достоверности аппроксимации R^2 равен 0,8818. Прочих зависимостей установлено не было. Зависимость числа цик-

лов нагружения образца до его разрушения для образцов из стали марки 17Г1С описывается уравнением

$$N = N_{\max} - 6,0 \cdot S^2, \quad (7)$$

где N_{\max} – максимальное количество циклов нагружения, выдерживаемое образцом;
 S^2 – значение дисперсии ТМН определенное для металла образца до испытаний.

После разрушения образцов измеряли ТМН в непосредственной близости к месту разрушения. Установлено, что значения дисперсия ТМН разрушенных образцов ($S^2_{\text{раз}}$) лежат в интервале от 2000 до 2500 НВ². До достижения этих значений происходит накопление повреждаемости, после чего материал разрушается.

Вследствие того, что в условиях эксплуатации накопление поврежденности металла может проходить с различной интенсивностью, предложена следующая формула для оценки остаточного ресурса $T_{\text{ост}}$ по измеренным значениям дисперсии ТМН $S^2_{\text{изм}}$

$$T_{\text{ост}} = \frac{(S^2_{\text{раз}} - S^2_{\text{изм}}) T_{\text{экс}}}{S^2_{\text{изм}} - S^2_{\text{нач}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{экс}}$ – время эксплуатации объекта на момент обследования, лет;

$S^2_{\text{нач}}$ – начальная дисперсия неповрежденного металла (определяется на трубах аварийного запаса и составляет порядка 200-300 НВ²).

На основании выполненных исследований составлена методика оценки остаточного ресурса основного металла труб магистральных нефтегазопроводов, изготовленных из низколегированной конструкционной стали марок 17ГС, 09Г2ФБ, 17Г2СФ и ближайших аналогов (рис. 11).

Основные выводы:

1. По результатам литературного обзора установлено, что в процессе эксплуатации нефтегазопроводов увеличивается гетерогенность структуры двухфазных трубных сталей: происходит снижение прочности зерна феррита и увеличение прочности границы зерна. Изменения в структуре можно определять неразрушающим методом, заключающимся в многократном измерении микротвердости или твердости с малой нагрузкой с последующим расчетом статистических характеристик.

2. Экспериментально установлено, что в образцах трубной стали происходит изменение дисперсии ТМН при приложении статической нагрузки $\sigma = 0,7\sigma_{0,2}$ при комнатной температуре через 30 минут после начала нагружения.

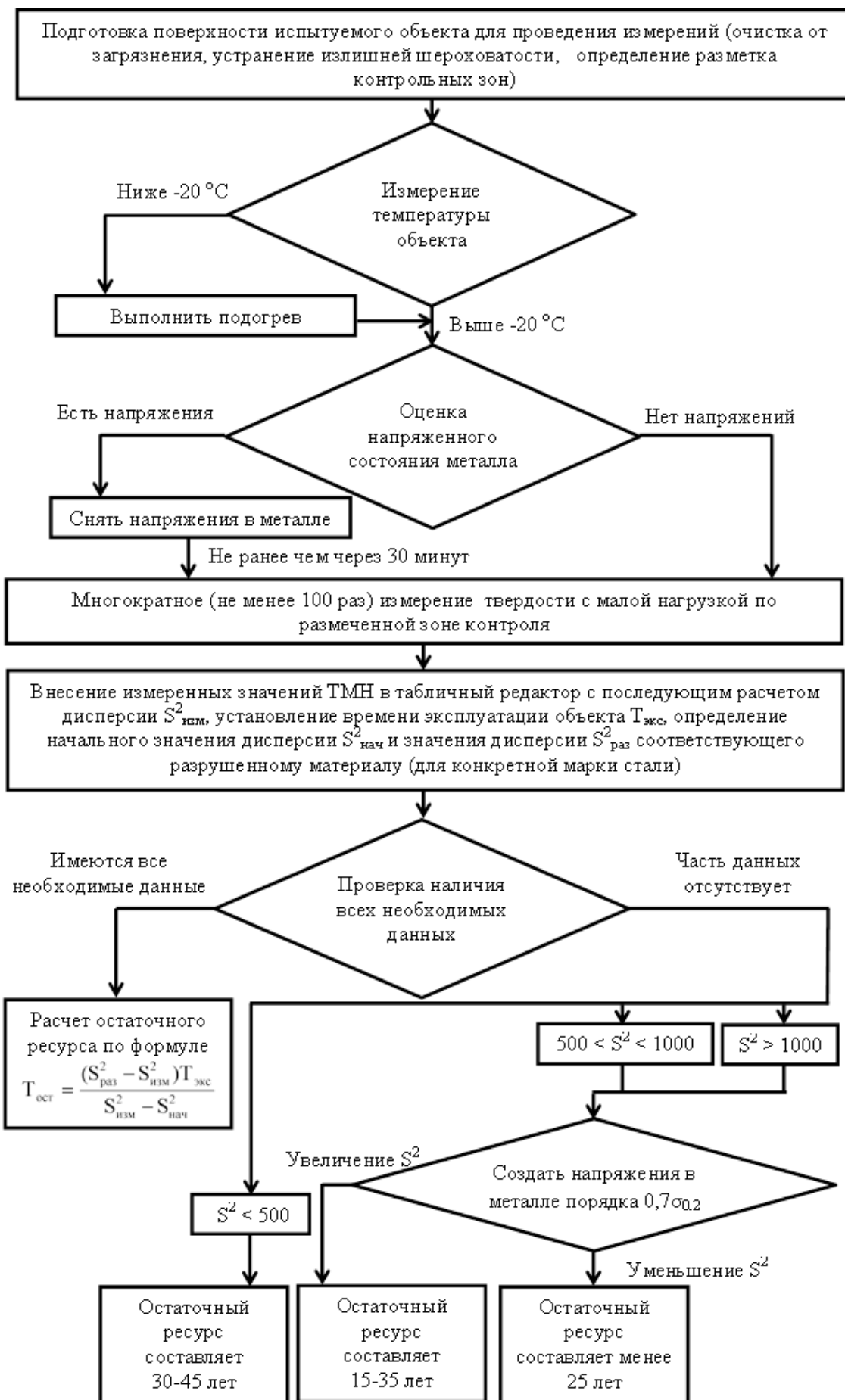


Рис. 11. Алгоритм оценки остаточного ресурса основного металла труб нефтегазопроводов

При однократном нагружении с последующим снятием нагрузки происходит неполная релаксация значений дисперсии ТМН: конечные значения превышают начальные, измеренные до нагружения на 25%. Установлено, что изменения происходят в равной степени по всей поверхности образца.

3. Установлена зависимость между работой, затраченной на разрушение металла и дисперсией ТМН для образцов, испытанных на ударный изгиб при положительных температурах, что позволяет без разрушения материала прогнозировать значения ударной вязкости металла. Проведение измерений ТМН с целью дальнейшего определения дисперсии значений целесообразно проводить при температурах не ниже -20°C для марки стали 17Г1С.

4. Лабораторными и стендовыми испытаниями доказано, что циклическое нагружение приводит к пропорциональному увеличению дисперсии ТМН тестируемого металла, определяемой по росту. Получена зависимость значения дисперсии измеренного до испытания от количества циклов нагружения до разрушения образца. Установлено, что после разрушения металла всех испытанных образцов характеризуется значением дисперсии 2000-2500 НВ².

5. Разработана методика определения дисперсии ТМН и расчета остаточного ресурса основного металла нефтегазопроводов при постоянных режимах эксплуатации на действующем объекте.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Александров, Ю. В. Неразрушающая диагностика деградиционных процессов в металле газопроводов / Ю. В. Александров, Р. В. Агинеи, А. Ю. Михалев // Газовая промышленность. – № 6. – 2011. – С. 60–63.

2. Михалев, А. Ю. Исследование повреждаемости металла магистральных газопроводов при стендовых циклических испытаниях / А. Ю. Михалев // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – № 1. – 2012. – С. 8–11.

3. Михалев, А. Ю. Исследование совместного влияния на металл трубопроводов длительных статических нагрузок и коррозионно-опасных факторов / А. Ю. Михалев, А. В. Свирида // Материалы XI международной молодежной научная конференция «Севергеоэкотех-2010» (17-19 марта 2010 г., Ухта) : в 5 ч.; ч. 4. – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 171–173.

4. Михалев, А. Ю. Предварительная подготовка образцов металла трубопровода для исследования влияния длительной статической нагрузки // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (13-15 апреля 2010 г.) : в 3 ч.; ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 246–248.

5. Михалев, А. Ю. Экспериментальное исследование изменения свойств металла трубопроводов при нагружении менее предела текучести / А. Ю. Михалев, С. Ю. Любимова // Рассохинские чтения: материалы межрегионального семинара (3-4 февраля 2011 года) / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 316–319.

6. Михалев, А. Ю. Изменение свойств металла трубопроводов под действием нормативных нагрузок / А. Ю. Михалев, С. Ю. Любимова, Ал. Ю. Михалев // Материалы XII международной молодежной научная конференция «Севергеоэкотех-2011» (16-18 марта 2011 г., Ухта) : в 5 ч.; ч. 2. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 243–245.

7. Михалев, А. Ю. Деградационные процессы в металле трубопроводов / А. Ю. Михалев, Н. С. Бекряшев, Ал. Ю. Михалев // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (20–23 сентября 2011 г.) : в 3 ч. ; ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 228–231.

8. Михалев, А. Ю. Метод неразрушающего контроля, чувствительный к процессам старения металла трубопроводов / А. Ю. Михалев, Ал. Ю. Михалев, Н. С. Бекряшев // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (20–23 сентября 2011 г.) : в 3 ч. ; ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2011. – С. 260–262.

9. Михалев, А. Ю. Применение результатов измерения твердости с малой нагрузкой для оценки степени состаренности стали магистральных трубопроводов / А. Ю. Михалев // Трубопроводный транспорт – 2011: материалы VII Международной учебно-научно-практической конференции, г. Уфа, УГНТУ, 10–11 ноября 2011 г. / редкол.: А. М. Шаммазов и др. – Уфа, Изд-во УГНТУ, 2011. – С. 70–71.

